

ALTERRA

Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

VERMINDERING STIKSTOFVERLIEZEN NAAR
GROND- EN OPPERVLAKTEWATER

ir. J.H.A.M. Steenvoorden

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

NOTA/1849

Deze nota is geschreven ten behoeve van de Post Hoger Landbouwonder-
wijs (PHLO) cursus 'Waterkwaliteit Landelijk Gebied; aspecten van
kwaliteitsbeheer'.

NOTA/1849

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. PROCESSEN IN DE BODEM	2
2.1. Waterhuishouding	2
2.2. Stikstofomzettingen	3
3. AFSPOELING	5
4. UITSPOELING VAN STIKSTOF	7
4.1. Algemeen	7
4.2. Uitspoeling in natuurlijke situaties	7
4.3. Invloed van grondwaterdiepte	8
4.4. Nitraatuitspoeling onder grasland	9
4.5. Nitraatuitspoeling onder bouwland- en snijmaisgrond	14
5. DENITRIFICATIE IN HET GRONDWATER	18
6. N-BELASTING OPPERVLAKTEWATER IN HET LANDELIJK GEBIED	20
7. MAATREGELEN TER VERMINDERING VAN STIKSTOFVERLIEZEN	22
7.1. Vermindering nitraatuitspoeling	22
7.2. Vermindering van stikstofafspoeling	23
8. SAMENVATTING	24
LITERATUUR	25



1. INLEIDING

De afgelopen jaren is het nitraatgehalte van het opgepompte grondwater van een aantal winningen onrustbarend gestegen. Bij de winningen in Montferland (G) en Reuver (L) heeft het nitraatgehalte zelfs de voor drinkwater maximaal toelaatbare waarde van $11,3 \text{ g.m}^{-3}$ (als N) bereikt (VAN BEEK e.a., 1984). Ook bij lokaal en regionaal grondwaterkwaliteitsonderzoek in verschillende regio's is naar voren gekomen dat het grondwater met name in zandgebieden tot op grote diepte verontreinigd kan zijn met nitraat (o.a. APPELO, 1982; MENSINK, 1983). Een relatie met het landbouwkundig bodemgebruik zal in veel gevallen waarschijnlijk zijn. Daarnaast komen ook situaties voor waarin geen of nauwelijks nitraatverontreiniging optreedt ondanks een intensief landbouwkundig bodemgebruik (VAN BENNEKOM, 1987; POMPER, 1988). Voor het oppervlaktewater zijn in het Indikatief Meerjaren Programma Water normen voor de basiskwaliteit geformuleerd die voor bepaalde stikstofverbindingen niet overal gehaald worden.

Door ontwikkelingen in de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater ten aanzien van stikstof en op het terrein van het waterkwaliteitsbeheer als gevolg van wetgeving is het gewenst om aandacht te besteden aan de factoren en processen die van invloed zijn op de stikstofverliezen vanuit de landbouw. In deze bijdrage wordt ingegaan op de afspoeling en de uitspoeling van stikstof en op de mogelijkheden om deze verliezen te verminderen.

2. PROCESSEN IN DE BODEM

2.1. Waterhuishouding

Gemiddeld valt in Nederland circa 760 mm neerslag per jaar, waarvan circa 460 mm als gevolg van verdamping door bodem en gewas naar de atmosfeer verdwijnt en circa 300 mm tot afvoer komt via grond- en oppervlaktewater. Belangrijke verschillen in verdamping en afvoer treden op onder invloed van bodemgebruiksvorm en grondwaterstand (tabel 1).

Tabel 1. Netto neerslagoverschot (mm.jr^{-1}) in afhankelijkheid van bodemgebruiksvorm en grondwatertrap (Gt) (AD HOC-GROEP VERDAMPING, 1984)

	Gt II t/m Gt V ¹⁾	Gt VI t/m Gt VII* ²⁾
gras	280	370
bouwland	290	400
snijmais	340	410
naaldbos	80	160
loofbos	260	300
heide	345	435

1) gemiddelde hoogste grondwaterstand circa 0,0-0,4 m-mv

2) gemiddelde hoogste grondwaterstand circa 0,6 m-mv en dieper

Neerslag en verdamping zijn niet gelijkmatig over het jaar verdeeld zoals figuur 1 illustreert. De periode april tot en met juli wordt veelal gekenmerkt door neerslagtekorten en de periode van medio augustus tot en met maart door neerslagoverschotten. Van augustus tot oktober vindt onder gemiddelde omstandigheden aanvulling van de bodemvoorraad plaats en daarna afvoer van de neerslagoverschotten.

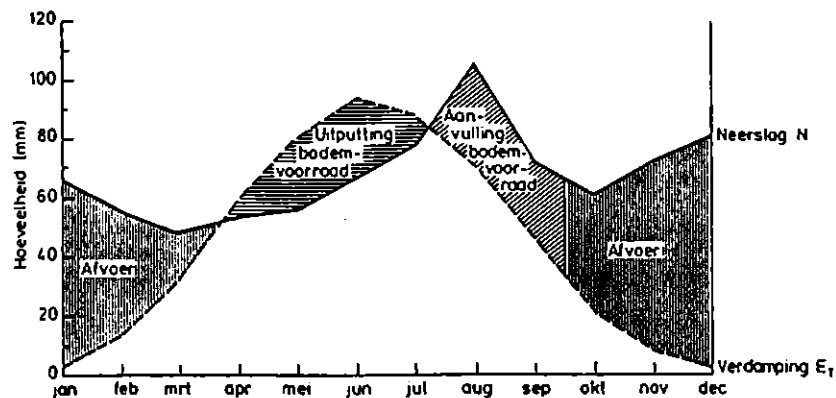


Fig. 1. Gemiddelde neerslag en potentiële verdamping in Nederland
(WESSELING, 1976)

Afvoer van neerslagoverschotten naar oppervlaktewater en grondwater vindt plaats door oppervlakte-afvoer, ondiepe en diepe uitspoeling. De verdeling van neerslagoverschotten over deze afvoercomponenten verschilt per grondsoort en ontwateringssituatie. Onder invloed van klimatologische condities treden grote verschillen op tussen jaren onderling (STEENVOORDEN, 1988). De waterhuishouding beïnvloedt de stikstofhuishouding zowel via het vochtgehalte (aeratie, mineralisatie, denitrificatie, gewasopname) als de waterfluxen (oppervlakte-afvoer en uitspoeling).

2.2. Stikstofomzettingen

Bij het waterkwaliteitsonderzoek vindt veelal analyse plaats van ammonium (NH_4^+), nitriet (NO_2^-), nitraat (NO_3^-) en organische gebonden N. De som van NH_4^+ en organische gebonden N wordt vastgesteld via de Kjeldahl-N analyse. Voor een goed begrip van de concentraties die gemeten kunnen worden in grond- en oppervlaktewater wordt hierna ingegaan op de interacties van N-verbindingen en de bodem.

Door de overwegend negatieve lading van bodemdeeltjes worden de NO_3^- en NO_2^- -ionen vrijwel even snel verplaatst als het water waarin ze zijn opgelost, terwijl de NH_4^+ -ionen sterk worden vertraagd als gevolg van adsorptieprocessen. Transport van organische gebonden N wordt bemoeilijkt omdat deze verbindingen veelal zowel positief als negatief geladen groepen bevatten. De mobiliteit is daardoor groter dan van NH_4^+ .

maar kleiner dan van NO_3^- . Het werkelijke transport wordt echter ook beïnvloedt door N-omzettingsprocessen die sterk worden gestuurd door factoren zoals: vochthuishouding en aeartie, temperatuur en zuurgraad. Het resultaat hiervan is dat in het groeiseizoen het van bemesting en mineralisatie afkomstige NH_4^+ zeer snel wordt omgezet in NO_3^- . Uitspoeling treedt daardoor vooral op in de vorm van NO_3^- . De aard van de N-processen wordt mede gestuurd door de C-huishouding van de bodem. Naarmate een bodem armer is aan N (hoog C/N-quotiënt) wordt meer van de gegeven of gevormde minerale N vastgelegd in bacteriën (organische stof) waardoor ook minder NO_3^- kan uitspoelen. Een hoge afbraaksnelheid van organische stof leidt, vooral in combinatie met hoge vochtgehalten in de bodem, snel tot anaerobe condities gevolgd door afbraak van NO_3^- door denitrificatie. Door de complexe samenhang van N-huishouding met water-, koolstof-, lucht- en temperatuurhuishouding is het zeer moeilijk om voor ingrepen het effect op de NO_3^- -uitspoeling te kwantificeren zonder ondersteuning van bijvoorbeeld veldonderzoek. Inmiddels zijn computermodellen ontwikkeld die, na toetsing met behulp van gegevens van veldexperimenten, kunnen worden benut voor de berekening van de gevolgen van verschillende bemestingsscenario's voor de nitraatbelasting van het grondwater (o.a. DRENT e.a., 1988).

3. AFSPOELING

Voor enig inzicht in de omvang van oppervlakte-afvoer en de factoren die daarop van invloed zijn wordt verwezen naar de PHLO-syllabus 'Verliezen van fosfaat vanuit landbouwgrond' (STEENVOORDEN, 1988). In genoemde syllabus wordt bovendien informatie gegeven over de relatie tussen de drijfmestgift en de gehalten aan Kjeldahl-N in de oppervlakte-afvoer. Naarmate de drijfmestgift lager en de periode tussen bemesting en oppervlakte-afvoergebeurtenis groter is, zijn de gehalten in de oppervlakte-afvoer lager. De factor tijd werkt enerzijds in op de N-processen (vervluchtiging, vastlegging), anderzijds op de hoeveelheid geïnfiltreerde neerslag waardoor mestbestanddelen in de loop van de tijd dieper de bodem in worden verplaatst.

Onder gemiddelde klimatologische omstandigheden vindt afspoeling van meststoffen hoofdzakelijk plaats in de periode oktober tot februari, wanneer vrijwel uitsluitend dierlijke meststoffen worden toegediend. Ook kunstmeststoffen kunnen echter betrokken zijn bij afspoeling, namelijk als een landbouwkundig minder goede ontwatering samengaat met hoge neerslagintensiteiten in het groeiseizoen. Deze situatie deed zich onder andere voor tijdens een onderzoek naar de gevolgen van slootpeilbeheer in een veenweidegebied op de stoffenbelasting van het water. Een bemesting met kalkammonsalpeter omstreeks begin maart 1983 werd gevolgd door een zeer nat voorjaar hetgeen leidde tot een verhoogde minerale N (NH_4^+ , NO_3^-) vracht via de greppelafvoer (fig. 2) door zowel afspoeling als ondiepe uitspoeling.

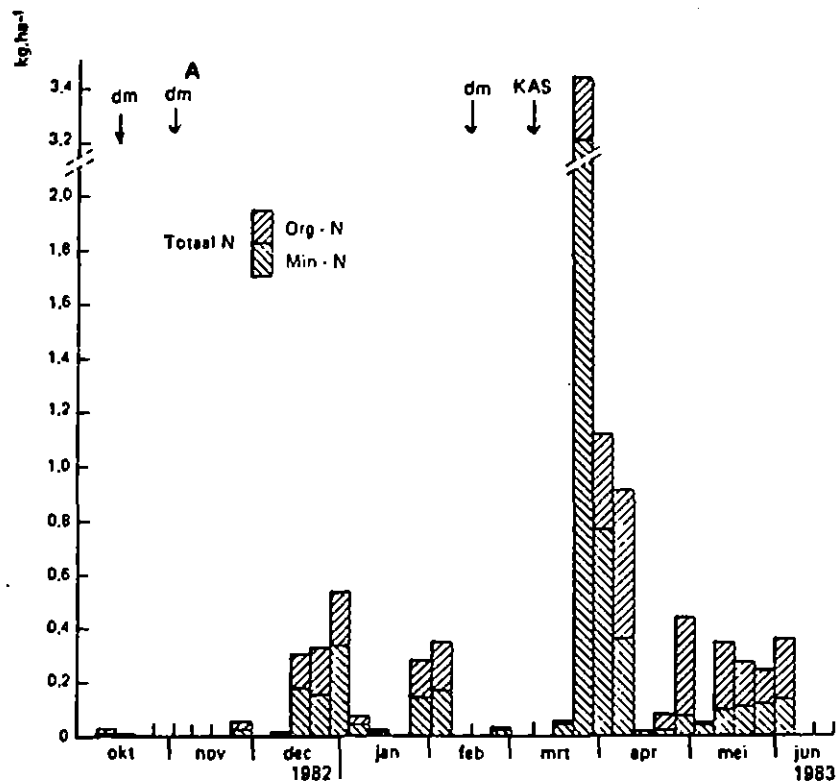


Fig. 2. Verloop van de stikstofvracht in de greppelafvoer bij hoogwaterpeil (30 cm-mv) in de periode 1982/83 in kg N per ha afwaterend oppervlak op het ontwateringsproefveld voor veenweidebedrijven te Zegveld (U). In de figuur is vermeld de bemesting naar soort (dm = drijfmest, KAS = kalkammonsalpeter) (PANKOW e.a., 1985)

4. UITSPOELING VAN STIKSTOF

4.1. Algemeen

Stikstofuitspoeling kan worden beschouwd vanuit twee invalshoeken, enerzijds de verliezen voor de vegetatie uit de bouwvoor of doorwortelde zone (emissie) en anderzijds de belasting van het grondwater met stikstofverbindingen en de gevolgen daarvan voor het milieu (immis-sie). Hier zal over stikstofuitspoeling in de eerste betekenis worden gesproken. Onder stikstofuitspoeling zal worden verstaan de afvoer van stikstof door het vlak van 1 meter onder maaiveld. Deze diepte kan worden gezien als de diepte waar beneden gewasopname geen invloed van belang heeft op de stikstofgehalten.

4.2. Uitspoeling in natuurlijke situaties

Om de invloed van bemesting op de gehalten van het zeer ondiepe grondwater te beoordelen kan men de gehalten vergelijken met die in dit grondwater onder natuurlijke terreinen. Tabel 2 geeft een indicatie van de niveaus die men onder invloed van de grondsoort kan verwachten.

Tabel 2. Stikstofgehalten (g.m^{-3} , als N) in het grondwater op 1 m onder mv onder een aantal niet-bemeste natuurterreinen op verschillende grondsoorten (BOTS et al., 1978; STEENVOORDEN, 1976)

	Zand	Hoogveen	Laagveen	Klei op veen	Zeeklei
NO_3^-	0,2	0,2	0,5	0,2	0,3
NH_4^+	0,4	0,8	2,5	0,7	7,7
Kjeldahl-N	0,9	1,3	5,5	1,3	11,1
Totaal-N	1,1	1,5	6,0	1,5	11,4

De laatste jaren worden onder bossen regelmatig hogere nitraatgehalten gevonden dan blijkt uit tabel 2 zelfs tot circa $2 \text{ g.m}^{-3} \text{ N}$ (STEENVOORDEN, 1987a). Dit kan waarschijnlijk in grote mate worden verklaard uit de toegenomen depositie van stikstof.

De verschillen binnen de grondsoort kunnen vrij groot zijn onder invloed van begroeiing, voedselrijkdom en waterhuishouding. Uit de gegeven voorbeelden blijkt dat met name de NH_4^+ - en Kjeldahl-N-gehalten kunnen stijgen onder invloed van de rijkdom van de bodem aan organische stof, zoals bij hoogveen en laagveen. In gebieden met onder brakke en zoute omstandigheden gevormde sedimenten worden nog hogere gehalten gevonden, zoals voor zeeklei is geconstateerd. Wel kan in dergelijke gebieden daardoor een aanzienlijke stoffenbelasting veroorzaken.

4.3. Invloed van grondwaterdiepte

Denitrificatie is een proces dat plaats vindt onder zuurstofloze condities. Hogere grondwaterstanden leiden tot hogere vochtgehalten in de bodem en tot een verminderde aeratie. De omstandigheden voor denitrificatie worden dus gunstiger bij hogere grondwaterstanden, vooral ook omdat in de bovenste meter van de bodem het organische stofgehalte stijgt naarmate een laag dichtter aan het maaiveld is gelegen. De invloed van de grondwaterdiepte is van belang in het traject vanaf maaiveld tot circa 1,50 m-mv, zoals blijkt uit een langjarig lysimeteronderzoek voor zandgrond (STEENVOORDEN, 1983). Op grond van deze meetgegevens is tabel 3 ontwikkeld. Deze tabel geeft aan in welke mate de nitraatuitspoeling vermindert bij stijgende grondwaterstanden ten opzichte van de nitraatuitspoeling bij hetzelfde bemestingsniveau maar bij een grondwaterstand van 1,25 m-mv of dieper.

De resultaten geven aan dat vooral gronden met diepere waterstanden, zoals Gt's VI en VII kwetsbaar zijn voor nitraatuitspoeling.

Tabel 3. Invloed van de grondwaterdiepte op de nitraatuitspoeling op het vlak van 1 m-mv

Gt ¹⁾	GHG ²⁾ (cm-mv)	Index
I	0	4
II	0	4
III	20	10
III*	40	22
IV	40	22
V	30	15
V*	40	22
VI	60	41
VII	90	73
VII*	≥125	100

1) grondwatertrap

2) gemiddeld hoogste grondwaterstand

4.4. Nitraatuitspoeling onder grasland

4.4.1. Algemeen

Het lot van stikstof is mede afhankelijk van de vorm waarin, de wijze waarop en hoeveel stikstof wordt toegediend. Bij grasland kan onderscheid worden gemaakt tussen N afkomstig van:

- mineralisatie uit humus en atmosferische depositie (leidt tot zgn. basisuitspoeling);
- kunstmest;
- beweiding;
- uitrijden van dierlijke mest.

De totale nitraatuitspoeling kan worden berekend door sommatie van de uitspoeling die optreedt als gevolg van elk van de 4 toevoerposten. De werkelijke belasting van het freatisch grondwater hangt af van de grondwaterstand (zie tabel 3).

4.4.2. Basisuitspoeling

De hoeveelheid organische stof in de bodem en de mineralisatiesnelheid zijn de resultante van onder andere de vormingsgeschiedenis en het bodemgebruik. Wanneer de bemesting wordt stopgezet komt door mineralisatie van de aanwezige organische stof nog vele jaren minerale N vrij. Met de N afkomstig van atmosferische depositie leidt deze tot de zogenaamde basisuitspoeling. Vanwege het ontbreken in het najaar van een gewas dat de vrijgekomen N kan opnemen is de basisuitspoeling van mais- en bouwland hoger dan van grasland (tabel 4).

Tabel 4. Basisuitspoeling bij een diepe grondwaterstand
(Gt VII*, GHG \geq 125 cm-mv). Naar WIGGERS e.a., 1986

grasland op zand	15 * kg N/ha/jaar
grasland op klei	5 kg N/ha/jaar
mais- en bouwland op zand	45 kg N/ha/jaar
mais- en bouwland op klei	25 kg N/ha/jaar
alle bodemgebruiksvormen op veen	0 kg N/ha/jaar

* hoger gesteld dan WIGGERS e.a., 1986

4.4.3. Uitspoeling van kunstmest

De mate waarin toegediende kunstmest-N verloren gaat door uitspoeling wordt sterk bepaald door de groeicondities zoals weer en bodemeigenschappen. Als diepe doorworteling mogelijk is en als een goede vochtvoorziening gewaarborgd is, zal het risico van nitraatuitspoeling minder groot zijn. Op grond van deze overwegingen is te begrijpen dat er voor zandgrond eigenlijk niet één uitspoelingspercentage te geven is omdat er binnen de zandgronden grote verschillen bestaan in capillaire eigenschappen en vochtberging. Op grond van beschikbare gegevens is onder andere voor grasland in tabel 5 het percentage van de kunstmestgift vermeld dat onder gemiddelde weersomstandigheden zal uitspoelen in situaties met een diepe grondwaterstand. Naarmate het bemestingsniveau stijgt neemt het uitspoelingspercentage toe.

Tabel 5. Uitspoeling aan nitraatstikstof uit kunstmest, optredende op 1 m-mv bij percelen met een diepe grondwaterstand (GtVII*, GHG \geq 125 cm-mv). De getallen geven de extra uitspoeling ten opzichte van de basisuitspoeling in procenten van de toege- diende hoeveelheid kunstmeststikstof. Naar WIGGERS e.a., 1986

Kunstmestgift (kg N/ha/jr):	100	200	300	400	500	600	700
grasland op zand	0	2	8	14	24	28	29
grasland op klei	0	1	2	5	6	7	7
grasland op veen	0	1	1,5	-	-	-	-
mais- en bouwland op zand	25	25	25	-	-	-	-
mais- en bouwland op klei	7	9	10	-	-	-	-

4.4.4. Uitspoeling door beweiding

De laatste decennia is op de Nederlandse weidebedrijven het gebruik van kunstmeststikstof en krachtvoer sterk gestegen. De benutting van de toegevoerde stikstof is echter gering. Tegenover een jaarlijkse externe toevoer op intensieve weidebedrijven van circa 545 kg N per ha (380 kg N via kunstmest, 125 kg N via krachtvoer, 40 kg N via atm. dep.) staat slechts een afvoer van circa 85 kg N per ha in de vorm van vlees en melk. Het jaarlijkse overschot van circa 460 kg N per ha gaat voornamelijk verloren door vervluchtiging van NH_3 , denitrificatie en uitspoeling (VAN DER MEER, 1986). Dat onder invloed van beweiding de nitraatuitspoeling sterk toe kan nemen is aangetoond door het onderzoek van GARWOOD and RYDEN (1986) (tabel 6).

Tabel 6. Jaarlijkse nitraatuitspoeling onder beweide en gemaaid gras- land voor een gedraineerde kleigrond in de periode 1977-1982

Kunstmest N ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$)	Beweiding	N-uitspoeling ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{jr}^{-1}$)
420	neen	58
400	ja	160

Naar de invloed van beweiding onder Nederlandse omstandigheden wordt momenteel onderzoek uitgevoerd op zand- en kleigrond bij een aantal bemestingsniveaus voor N. Vooruitlopende op meer definitieve gegevens is ten behoeve van de mestregelgeving in grondwaterbeschermingsgebieden een rekenmethode ontwikkeld om de extra uitspoeling door beweiding te kwantificeren (WERKGROEP DIFFUSE VERONTREINIGING, 1988). Bij beweiding komt op de urineplekken circa 360 kg N op de bodem. Het deel van de bodem waar dit optreedt hangt af van het graslandgebruikssysteem en varieert globaal van circa 15 tot circa 25%. Op basis van tabel 5 wordt door genoemde werkgroep in haar rapport voor dit deel van de bodem de extra uitspoeling berekend.

4.4.5. Uitspoeling na uitrijden van dierlijke mest

In het kader van het Besluit Gebruik Dierlijke Meststoffen van 25 maart 1987 zijn er regels gesteld voor het uitrijden van dierlijke mest in najaar en winter. Bijstelling van deze regels kan eventueel plaats vinden met ingang van 1991. Voorlopig zal men voor braak liggend bouwland en snijmais op zandgrond rekening moeten houden met een uitrijverbod van dierlijke mest tussen oogst en 31 oktober. Voor grasland geldt voor alle grondsoorten een uitrijverbod tussen 1 oktober en 30 november. Voor met sneeuw bedekte grond geldt in het voorjaar een aanvullende regeling.

In tabel 7 is aangegeven welk percentage van de toegediende dierlijke N uitspoelt in afhankelijkheid van het toedieningstijdstip. De zeer lage uitspoeling onder grasland is recentelijk bevestigd in een Engels veldexperiment (THOMPSON e.a., 1987). De N-verliezen treden vrijwel uitsluitend op door vervluchtiging en denitrificatie.

Tabel 7. Uitspoeling van stikstof uit dierlijke mest, optredend op 1 m-mv bij percelen met een diepe grondwaterstand (Gt VII*, GHG \geq 125 cm-mv). De percentages voor grasland gelden voor doseringen tot 300 kg N-totaal/ha op grasland en 100 kg N-totaal/ha op mais- en bouwland

Toedieningstijdstip	Mais- en bouwland		Grasland		
	zand ¹⁾	klei ²⁾	zand ²⁾	klei ²⁾	veen ²⁾
augustus	30	20	2	1,5	0,5
oktober	22	14	3	2	1
februari/maart	8	4	1	1	0

1) gemeten door VETTER en STEFFENS (1981) bij grondwaterstanden van 2-3 m-mv (tabel 13, WIGGERS e.a., 1986)

2) raming aan de hand van 1) en gegevens met betrekking tot kunstmest-uitspoeling

4.4.5. Totale uitspoeling onder grasland

De totale nitraatuitspoeling kan worden berekend uit de gegevens over basisuitspoeling en uitspoeling ten gevolge van beweiding en bemesting met kunstmest en dierlijke mest (par. 4.4.2. t/m 4.4.5.). Als bovendien de grondwatertrap bekend is kan de nitraatbelasting van het grondwater op het vlak van 1 m-mv worden berekend (par. 4.3.). Voor enkele graslandgebruikssystemen is deze berekening uitgevoerd voor de situatie dat geen dierlijke mest wordt uitgereden. De bijdrage van deze laatste post is overigens gering. De resultaten geven aan dat het gebruikssysteem grote invloed heeft op de nitraatuitspoeling.

Tabel 8. Totale N-uitspoeling op het vlak van 1 m-mv voor een aantal graslandgebruikssystemen op zandgrond bij enkele grondwatertrappen. Het nitraatgehalte is berekend uitgaande van een grondwatervoeding van 300 mm.jaar^{-1} . Er is geen rekening gehouden met het uitrijden van dierlijke mest

Kunstmest-N ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{jr}^{-1}$)	Gebruiks- systeem	Melkvee ¹⁾ (koe.ha^{-1})	N-uitspoeling bij Gt VII* ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{jr}^{-1}$)	N-gehalte bij Gt VII* (g.m^{-3})	N-gehalte bij Gt VI (g.m^{-3})	N-gehalte bij Gt V (g.m^{-3})
400	geen beweiding	-	71	24	10	4
400	dag en nacht beweiden	2,0	122	41	17	6
300	dag en nacht beweiden	1,7	82	27	11	4
200	dag en nacht beweiden	1,4	29	10	4	2

1) met bijbehorend jongvee

4.5. Nitraatuitspoeling onder bouwland- en snijmaisgrond

4.5.1. Algemeen

Een belangrijke reden om onderscheid te maken tussen grond die in gebruik is voor de akkerbouw of als snijmais is het verschil in bemestingsniveau. Vrijwel alle akkerbouwgewassen ondervinden nadelige effecten van te hoge N-bemestingen. Snijmais daarentegen kan bijzonder hoge N-doseringen verdragen zonder noemenswaardige gevolgen voor de gewasproductie. In de praktijk is snijmais mede daardoor een belangrijk gewas geworden in gebieden met mestoverschotten. Bij de normstelling ten aanzien van de maximaal toelaatbare hoeveelheid dierlijke mest in het kader van het Besluit Gebruik Dierlijke Meststoffen is om deze reden eveneens onderscheid gemaakt tussen bouwland en snijmais. De totale nitraatuitspoeling onder bouwland en snijmais kan worden berekend door uit te gaan van de verschillende N-bronnen, namelijk:

- mineralisatie uit humus en atmosferische depositie (zgn. basisuitspoeling);
- kunstmest;
- uitrijden van dierlijke mest.

Na sommatie van de uitspoeling van elk van de N-bronnen dient de totale uitspoeling nog gecorrigeerd te worden voor de invloed van de grondwaterdiepte (par. 4.3., tabel 3).

4.5.2. Basisuitspoeling

In par. 4.4.2. is reeds op de achtergrond van de basisuitspoeling ingegaan. De waarden van de basisuitspoeling (tabel 4) gelden voor een diepe ontwatering. De mogelijkheid bestaat dat de basisuitspoeling van snijmaisland, dat jarenlang zwaar is bemest, hoger is dan de vermelde 45 kg N per ha per jaar.

4.5.3. Uitspoeling van kunstmest

De nitraatuitspoeling onder bouwland en snijmais is voor gemiddelde weersomstandigheden in tabel 5 weergegeven als percentage van de kunstmestgift. Ten aanzien van de nitraatuitspoeling onder bouwland heeft het bouwplan invloed door bemestingsniveau, tijdstip van zaaien en oogsten, bewortelingsdiepte, biologische N-binding en gewasresten die achterblijven. Vlinderbloemigen veroorzaken een relatief hoge nitraatuitspoeling als gevolg van de binding van atmosferische N in de wortelknolletjes. De extra uitspoeling ten opzichte van een normaal bouwplan met zomergewassen op zandgrond kan uiteenlopen van circa 50 kg N per ha na klaver tot 160 kg N per ha na erwten (KOLENBRANDER, 1977).

De vermelde percentages moeten dus gezien worden als een indicatie van de grootte-orde. De lagere uitspoeling onder kleigrond ten opzichte van zandgrond (bij hetzelfde bemestingsniveau) wordt veroorzaakt door de gunstiger condities voor denitrificatie, samenhangende met de bodemstructuur, en door de mogelijkheid om grotere hoeveelheden neerslag te bergen zodat een minder diepe uitspoeling optreedt. Met name zandgrond in gebruik als bouwland of snijmaisland bij diepere waterstanden blijkt een belangrijke bron van nitraatvervuiling te zijn.

4.5.4. Uitspoeling na uitrijden van dierlijke mest

Voor informatie over de N-uitspoeling na het uitrijden van dierlijke mest wordt verwezen naar par. 4.4.5. In principe heeft de snelheid waarmee dierlijke mest wordt ondergewerkt of ingewerkt invloed op de hoogte van de nitraatuitspoeling. Naarmate sneller wordt ondergewerkt is de ammoniakvervluchtiging geringer, neemt de denitrificatie toe (THOMPSON e.a., 1987) en wordt het risico van uitspoeling groter. Naar verwachting zou de uitspoeling toe kunnen nemen van 25% naar 27,5% van de totale N-bemesting. Het belangrijkste voordeel van onderwerken is gelegen in de vermindering van de ammoniakdepositie in natuurlijke terreinen en van het afspoelingsrisico.

4.5.5. Totale uitspoeling onder bouwland- en snijmaaisgrond

De totale nitraatuitspoeling bij een ondiepe ontwatering kan worden berekend door sommatie van de uitspoelingen zoals beschreven in par. 4.5.2. tot en met 4.5.4. Bij ontwateringssituaties met een lagere G_t dan VII* dient gecorrigeerd te worden volgens tabel 3. Voor een aantal situaties is in tabel 9 het nitraatgehalte van het freatisch grondwater berekend.

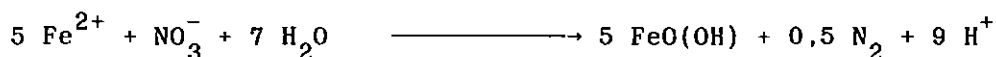
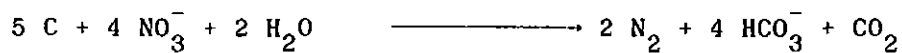
Bij hoge mestdoseringen met dierlijke mest, zoals op zandgrond voor kan komen is het tijdstip van uitrijden van dierlijke mest nauwelijks van invloed op de grootte van de uitspoeling. De overmaat aan stikstof is namelijk of het ene jaar of het andere jaar betrokken bij het uitspoelingsproces.

Tabel 9. Nitraatgehalten van het freatisch grondwater voor enkele bemestingssituaties bij bouwland en snijmais als de grondwatervoeding 300 mm.jr^{-1} bedraagt. De basisuitspoeling is verdisconteerd in de uitspoeling

	Zand		Klei	
	bouwland	snijmais	bouwland	snijmais
<u>bemesting</u> (kg.ha ⁻¹ .jr ⁻¹ als N)				
kunstmest	200	-	200	200
dierlijke mest	-	850	-	-
<u>bemestingstijdstip</u>		voorjaar		
	voorjaar	of najaar	voorjaar	voorjaar
<u>uitspoeling</u> (kg.ha ⁻¹ .jr ⁻¹ als N; Gt VII*)				
	95	215	43	43
<u>N-concentratie</u> (g.m ⁻³ als N) bij:				
Gt VII*	32	72	14	14
Gt VII	23	53	10	10
Gt VI	13	30	5,7	5,7

5. DENITRIFICATIE IN HET GRONDWATER

Denitrificatie is het proces waarbij NO_3^- wordt gereduceerd tot gasvormige N-verbindingen (N_2 , N_2O) en andere verbindingen worden geoxydeerd. In de literatuur zijn aanwijzingen te vinden dat denitrificatie zowel door microbiologische als chemische processen kan plaatsvinden. Als oxydeerbare stoffen fungeren organische koolstof, pyriet (FeS_2) en ijzer, waarvoor de volgende vergelijkingen kunnen worden gegeven (KOLLE e.a., 1983):



Over het algemeen is de kennis over denitrificatie in het verzadigd grondwatersysteem zeer beperkt. Uit veldonderzoek komen aanwijzingen naar voren dat denitrificatie een rol speelt in de verandering van de chemische samenstelling van het grondwater (POMPER, 1988; VAN BENNEKOM, 1987) maar de kwantificering wordt bemoeilijkt omdat kwaliteitsveranderingen eveneens veroorzaakt kunnen worden door menging met ander grondwater. Bestudering van dit proces vindt dan ook veelal plaats met behulp van grondkolommen (KOPPERS, 1984). Belangrijke factoren bij het denitrificatieproces met behulp van organische stof zijn vooral het organische stofgehalte en de zuurgraad (STEENVOORDEN, 1983). Het denitrificerend vermogen van een geologische formatie kan worden geschat op basis van het organische stofgehalte en de zuurgraad als de verblijftijd van het grondwater in deze formatie bekend is (STEENVOORDEN, 1983). Enkele waarden worden in tabel 10 gegeven, uitgaande van een halveringstijd voor organische stof in de ondergrond van 250 jaar. De optimum pH-waarde voor het denitrificatieproces is circa 7, terwijl de minimum pH-waarde circa 3,5 bedraagt.

Tabel 10. Jaarlijkse verlaging van het N-gehalte van het grondwater (g.m^{-3}) door denitrificatie bij een verblijftijd van 1 jaar in een bodemlaag met 0,2 respectievelijk 0,4% organische stof voor enkele pH-waarden

Organische stof	pH = 6	pH = 5	pH = 4
0,2%	12,2	6,5	0,5
0,4%	25	13	1,0

Van de verspreiding van organische stof in geologische formaties is tot nu toe bijzonder weinig bekend. De beschikbare informatie duidt op een grote variatie binnen een bepaalde geologische formatie (RUIKEN en STEENVOORDEN, 1986). De hoeveelheid organische stof in de ondergrond is een eindige voorraad. Afhankelijk van de afbreekbaarheid van de organische stof loopt het denitrificerend vermogen in de loop van een aantal decennia of eeuwen terug naar een waarde nul. De werkelijke betekenis van een geologische formatie voor de denitrificatie kan alleen worden gekwantificeerd als de hydrologie van de regio in beschouwing wordt genomen in verband met de verblijftijd van het grondwater.

Bij denitrificatie met organische stof kunnen geringe hoeveelheden NH_4^+ uit de organische stof vrijkomen. Als wordt aangenomen dat het vrij stabiele organische stof betreft met een C/N-quotiënt van circa 40 dan komt bij denitrificatie van $25 \text{ g.m}^{-3} \text{ NO}_3^-$ (als N) circa $0,6 \text{ g.m}^{-3} \text{ NH}_4^+$ (als N) vrij. Vindt denitrificatie plaats met behulp van pyriet dan worden aanzienlijke hoeveelheden sulfaat gevormd, zoals de gegeven reactievergelijking illustreert en bij experimenten ook is gevonden (KOLLE e.a., 1983; KOPPERS, 1984). Denitrificatie van $25 \text{ g.m}^{-3} \text{ NO}_3^-$ (als N) gaat gepaard met een aanrijking van circa $150 \text{ g.m}^{-3} \text{ SO}_4^{2-}$, een hoeveelheid die maximaal in drinkwater mag voorkomen.

6. N-BELASTING OPPERVLAKTEWATER IN HET LANDELIJK GEBIED

Oppervlakte-afvoer en uitspoeling kunnen grote verschillen in stikstofbelasting van het oppervlaktewater tussen gebieden veroorzaken onder invloed van verschillen in hydrologische situatie, grondsoort en bodemgebruik. Bij een omvangrijk waterkwaliteitsonderzoek in de provincies Groningen, Friesland, Drenthe en een deel van Overijssel is aandacht besteed aan deze regionale verschillen (BOTS e.a., 1978). Voor verschillende typen oppervlaktewateren is in afhankelijkheid van de grondsoort voor respectievelijk zomer- en winterperiode nagegaan wat het gehalte is aan nitraat, ammonium, Kjeldahl-stikstof en totaal-stikstof (tabel 11). In de winterperiode is het totaal-stikstof gehalte veelal hoger dan in de zomerperiode doordat in de winterperiode de invloed van biologische processen in het oppervlaktewater minder is en bovendien de verblijftijd binnen het gebied kleiner. De gehalten in de winterperiode variëren van circa 3 g.m^{-3} N voor petgaten en plassen in het laagveengebied tot ruim 7 g.m^{-3} N voor de beken in het zandgebied. Het gehalte in sloten en boezemwateren voor de meeste bodemtypen bedraagt 5 tot 7 g.m^{-3} N.

Tabel 11. Invloed van grondsoort en type oppervlaktewater op het gehalte aan nitraat, ammonium, Kjeldahl-N en totaal-stikstof (alles in g.m^{-3} N) in zomer- en winterperiode in de provincies Groningen, Friesland, Drenthe en een deel van Overijssel (BOTS e.a., 1978)

	NO_3^- (N)		NH_4^+ (N)		Kjeldahl-N		Totaal-N	
	Z	W	Z	W	Z	W	Z	W
KLEI: Sloten	0,1	2,7	0,2	0,6	4,0	3,2	4,1	5,9
Plassen	0,1	1,6	0,2	0,5	5,8	3,0	5,9	4,6
Boezemwater	0,5	2,4	0,9	1,8	4,8	4,4	5,3	6,8
KLEI OP VEEN:								
Sloten	0,2	3,3	0,6	1,0	3,5	3,3	3,7	6,6
Plassen	0,2	1,5	0,5	0,3	2,9	3,5	3,1	5,0
Boezemwater	0,3	2,1	0,1	0,9	2,9	3,2	3,2	5,3
Meren	0,4	-	0,0	-	2,8	-	3,2	-
LAAGVEEN:								
Sloten	0,4	2,4	0,5	1,1	2,5	3,2	2,9	5,6
Petgaten/plassen	0,1	1,0	0,2	0,5	2,8	1,9	2,9	2,9
ZAND: Beken	0,2	5,3	0,4	0,7	1,6	1,9	1,8	7,2

In de zomerperiode ligt het totaal-stikstofgehalte veelal tussen 2 en 4 g.m⁻³ N uitgezonderd enkele watertypen in kleigebieden waar het gehalte hoger ligt. Het aandeel van nitraat in de zomerperiode is overal niet meer dan ongeveer 10% van het totaal-stikstofgehalte, waarschijnlijk vooral als gevolg van denitrificatie door de waterbodem. In de winterperiode ligt het aandel op meer dan 30% en in beken zelfs op meer dan 70%. Het aandeel van ammonium bedraagt 's zomers niet meer dan 20% en 's winters niet meer dan 70% van het totaal-stikstofgehalte. De resultaten van een regionaal waterkwaliteitsonderzoek in Noord-Holland benoorden het IJ wijken daar niet veel van af (WERKGROEP NOORD-HOLLAND, 1982). In deze regio worden echter, met name in de winterperioden, nog hogere totaal-stikstofgehalten gevonden dan voor klei- en veengebieden is aangegeven. De oorzaak hiervan is gelegen in de hogere gehalten die in grond- en kwelwater worden aangetroffen en in perioden met neerslagoverschotten naar het oppervlaktewater worden afgevoerd.

In zandgebieden met zeer intensieve veehouderij worden soms beduidend hogere gehalten gevonden dan tabel 11 aangeeft. In enkele wateren in het Peelgebied en op de Westelijke Veluwe zijn gemiddelde gehalten gevonden die ongeveer een factor 2 hoger zijn (MENSINK, 1983; STEENVOORDEN e.a., 1987).

Over het algemeen zijn de in het oppervlaktewater gemeten nitraatgehalten lager dan op basis van de gegevens over uitspoeling naar het freatisch grondwater mag worden verwacht. Enerzijds hangt dit samen met een vertraging als gevolg van de stroming door de ondergrond anderzijds met denitrificatie in het grondwater (o.a. STEENVOORDEN, 1987).

7. MAATREGELEN TER VERMINDERING VAN STIKSTOFVERLIEZEN

7.1. Vermindering nitraatuitspoeling

De huidige situatie ten aanzien van dierlijke meststoffen wordt gekenmerkt door regionale overschotten waaraan slechts ten dele een nuttige bestemming kan worden gegeven. Op basis van de Wet Bodembescherming zal deze situatie tot medio het jaar 2000 blijven bestaan. Niet overal zal dus onnodige nitraatuitspoeling voorkomen kunnen worden. In bepaalde gebieden, zoals beschermingszones rond waterwingebieden en natuurterreinen, kunnen echter al wel zinvolle maatregelen worden genomen. Landelijk dienen echter ook ontwikkelingen te worden gestimuleerd die in zijn algemeenheid leiden tot een betere benutting van de toegediende N. Als mogelijke maatregelen kunnen worden genoemd:

- 1) Optimalisering van de N-bemesting bij ongewijzigd bodemgebruik:
 - een betere advisering van de N-bemesting rekening houdend met vochtleverantie van de bodem, weer en N-levering door mineralisatie van de humus (voor grasland en bouwland).
- 2) Verbetering van de N-benutting bij ongewijzigd bodemgebruik:
 - berekening in droge perioden; dit voorkomt uitspoeling van niet opgenomen N (STEENVOORDEN, 1987) (voor grasland en bouwland);
 - uitrijden van dierlijke mest in het voorjaar in plaats van in het najaar (vooral bouwland);
 - toepassing van nitrificatieremmers bij injectie/onderwerken van dierlijke mest in najaar of winter als deze bemesting uit landbouwkundige overwegingen wenselijk is (PANKOW en VAN DEN TOORN, 1986) (voor grasland en bouwland);
 - toepassing van winterbodembedekkers (voor bouwland). Deze maatregel is zinvoller naarmate het tijdstip van inzaaien in het najaar vroeger is;
 - afvoeren van gewasresten na de oogst van bijvoorbeeld bieten en aardappels; dit voorkomt uitspoeling als gevolg van verhoogde mineralisatie;
 - geen waterhuishoudkundige maatregelen die leiden tot een te diepe grondwaterstand en een reductie in de capillaire opstijging, bijvoorbeeld door te diepe ontwatering en te grote grondwateronttrekking (voor grasland en bouwland).

3) Wijziging van het bodemgebruik:

- het tegengaan van de teelt van snijmais ter voorkoming van overdosering van dierlijke mest;
- geen beweiding van grasland maar stalvoeding. Op deze wijze kunnen faeces en urine van het vee worden ingepast in het bemestingsplan;
- het tegengaan van de teelt van vlinderbloemigen;
- lagere bemestingsniveaus.

4) Uit productie nemen van landbouwgronden:

- deze maatregel zal vooral in aanmerking kunnen komen op de meest kwetsbare gronden, namelijk zandgronden met Gt VI, VII en VII*.

7.2. Vermindering van stikstofafspoeling

Voor een wat uitvoeriger behandeling van de mogelijke maatregelen ter vermindering van de stikstofafspoeling wordt verwezen naar de syllabus 'Verliezen van fosfaat vanuit landbouwgrond' (STEENVOORDEN, 1988).

Hierna zal een beknopt overzicht worden gegeven van mogelijke maatregelen waarbij aan de problematiek van de terugdringing van het landelijk mestoverschot in dit kader voorbij wordt gegaan.

1) Ten aanzien van de toepassing van (dierlijke) meststoffen:

- zorgen voor voldoende opslagcapaciteit;
- zo weinig mogelijk bovengrondse toediening van dierlijke mest (injectie/onderploegen, enz.);
- geen mesttoediening op bevroren gronden;
- bufferstrook tussen oppervlaktewater en bemeste land als injectie/onderploegen, enz. niet mogelijk is.

2) Ten aanzien van bodem- en waterhuishouding:

- zorg dragen voor een goede bodemstructuur (verdichting!);
- zorg dragen voor een landbouwkundig goede afwatering en ontwatering.

8. SAMENVATTING

In deze bijdrage wordt ingegaan op de stikstofhuishouding van landbouwgronden en de invloed van landbouw op de stikstofbelasting van grond- en oppervlaktewater. Na een korte behandeling van enkele aspecten van de waterhuishouding en stikstofomzettingsprocessen in de bodem wordt achtereenvolgens ingegaan op de afspoeling en uitspoeling van stikstof. Afspoeling treedt hoofdzakelijk op in het winterhalfjaar en leidt tot verontreiniging met ammonium en organische N, vooral als oppervlakte-afvoer optreedt na een recente bemesting. Stikstofuitspoeling doet zich vrijwel uitsluitend voor in de vorm van nitraat.

Nitraatuitspoeling komt tot stand onder invloed van de stikstoftoevoer via mineralisatie uit humus, atmosferische depositie en bemesting met dierlijke mest en kunstmest. Op grasland geeft beweiding aanleiding tot extra uitspoelingsverliezen. Aangegeven is op welke wijze de nitraatuitspoeling uit elk van de N-bronnen en de totale nitraatuitspoeling kan worden berekend. Bij de berekening van de nitraatbelasting van het freatische grondwater dient rekening te worden gehouden met het grondwaterniveau.

De mate waarin de nitraatuitspoeling naar het freatische grondwater gevolgen heeft voor het diepere grondwater en het oppervlaktewater hangt mede af van de mogelijkheid van denitrificatie onder invloed van organische stof, pyriet en ijzer. Voor denitrificatie met organische stof wordt aangegeven hoe deze kan worden gekwantificeerd.

Met behulp van resultaten uit regionale studies wordt aangegeven welke gehalten aan NH_4^+ , NO_3^- en organische N in het oppervlaktewater mogen worden verwacht in zomer en winter in afhankelijkheid van de grondsoort.

Maatregelen ter vermindering van de nitraatuitspoeling zijn vooral zinvol voor landbouwgronden bij diepere grondwaterstanden. Een vermindering kan worden bereikt door optimalisering van de N-bemesting, verbetering van de N-benutting, wijziging van het landbouwkundig bodemgebruik en eventueel door het uit productie nemen van landbouwgronden. De afspoelingsproblematiek kan worden verminderd door regelingen ten aanzien van het tijdstip en de techniek van mesttoedienen en door aandacht voor bodemstructuur en waterhuishouding.

LITERATUUR

- AD HOC-GROEP VERDAMPING, 1984. Herziening van de berekening van de verdamping in het hydrologisch model GELGAM. Begeleidingsgroep GELGAM, Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer, Rijkswaterstaat, Arnhem.
- APPELO, C.A.J., G.J.W. KRAJENBRINK, C.C.D.F. VAN REE en L. VASAK, 1982. Beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit in het infiltratiegebied van de noordwestelijke Veluwe. Instituut voor Aardwetenschappen. Vrije Universiteit, Amsterdam, 140 pp.
- BEEK, C.G.E.M. VAN, D. VAN DER KOOT, P.C. NOORDAM en J.C. SCHIPPERS, 1984. Nitraat en drinkwatervoorziening. Meded. 84. KIWA, Nieuwegein, 144 pp.
- BENNEKOM, C.A. VAN, 1987. Kwaliteitsveranderingen van grondwater als gevolg van uitspoeling van meststoffen. *H₂O* 20,9: 194-199.
- BOTS, W.C.P.M., P.E. JANSEN en G.J. NOORDEWIER, 1978. Fysisch-chemische samenstelling van oppervlakte- en grondwater in het noorden des lands. Regionale Studies 13, 90 pp, ICW, Wageningen.
- DRENT, J., J.G. KROES en P.E. RIJTEMA, 1988. Nitraatbelasting grondwater in het Zuid-Oosten van Noord-Brabant. Rapport in druk, ICW, Wageningen, 65 pp.
- GARWOOD, E.A. and RYDEN, J.C., 1986. Nitrate loss through leaching and surface runoff from grassland: Effects of water supply, soil type and management. In: Nitrogen fluxes in intensive grassland systems. Dev. in Plant and Soil Sci., Martinus Nijhoff Publ. Dordrecht vol. 23: 99-113.
- KOLENBRANDER, G.J., 1977. Nitrogen in organic matter and fertilizer as a source of pollution. Prog. Wat. Techn. vol. 8, 4/5: 67-84. Pergamon Press.
- KOLLE, W., P. WERNER, O. STREBEL und J. BÖTTGER, 1983. Denitrifikation in einem reduzierenden Grundwasserleiter. *Vom Wasser* 61, pp 125-147.
- KOPPERS, R.G.M., 1984. Onderzoek naar de verplaatsing van stikstof in de ondergrond van een veehouderijbedrijf ten oosten van Deurne (N.Br.). Nota 1519, ICW, Wageningen, 45 pp.

- MEER, H.G. VAN DER, 1987. Mogelijkheden tot verbetering van de benutting van stikstof op grasland. Jaarverslag 1986. p. 34-41. Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek, Wageningen.
- MENSINK, J.A., 1983. Milieuhygiënische aspecten van de intensieve veehouderij. Deelrapport 3: Onderzoek in een proefgebied nabij Lunteren. Dienst Milieuhygiëne Provincie Gelderland, 76 pp.
- PANKOW, J., A. VAN DEN TOORN, C.G. TOUSSAINT en J.H.A.M. STEENVOORDEN, 1985. De gevolgen van verschillen in open waterpeil op de stoffenbelasting van het water op het Regionaal Onderzoek Centrum te Zegveld. ICW nota 1652. Wageningen, 76 pp.
- POMPER, A.B., 1988. Geohydrochemisch onderzoek in het Zuidelijk Peelgebied, II. Nota in voorbereiding ICW, Wageningen.
- RUIKEN, M.J. en J.H.A.M. STEENVOORDEN, 1986. Organische stofgehalten in de ondergrond van het Zuidelijk Peelgebied. Nota 1709, ICW, Wageningen, 10 pp.
- STEENVOORDEN, J.H.A.M., 1976. Nitrogen, phosphate and biocides in groundwater as influenced by soil factors and agriculture. Techn. Bull. 97, ICW, Wageningen.
- 1983. Nitraatbelasting van het grondwater in zandgebieden; denitrificatie in de ondergrond. Nota 1435, ICW, Wageningen, 32 pp.
- 1987. Nitraatgehalten in grond- en oppervlaktewater van een intensief rundveehouderijbedrijf in relatie tot de hydrologische situatie. ICW nota 1799, Wageningen, 33 pp.
- 1987a. Stikstofverbindingen. In: Handboek voor Milieubeheer. Bodembescherming, 17 pp.
- 1988. Verliezen van fosfaat vanuit landbouwgrond. Nota 1838, ICW, Wageningen, 21 pp.
- , W. VAN DOORNE en A.M.H. VAN HEESSEN, 1987. Bijdrage van de landbouw aan de stikstof-, fosfaat- en chloridebelasting van het oppervlaktewater in zes afwateringsgebieden in de Zuidelijke Peel. ICW nota 1785. Wageningen, 49 pp.
- THOMPSON, R.B., J.C. RYDEN and D.R. LOCKYER, 1987. Fate of nitrogen in cattle slurry following surface application or injection to grassland. J. Soil Sci. 38, 689-700.
- TOORN, A. VAN DEN en J. PANKOW, 1987. Invloed van nitrificatieremmers bij bouwland op zandgrond op de kwaliteit van het grondwater (DROEVENDAAL 1985/'86). Nota 1765, ICW, 15 pp.

- VETTER, H. and G. STEFFENS, 1981. Leaching of nitrogen after spreading of slurry. In: Brogan J.C. (Ed.): Nitrogen losses and surface run-off from landspreading of manures. Dev. in Pl. and Soil Sc. Martinus Nijhoff/dr. W. Junk, The Hague, vol. 2: 251-270.
- WERKGROEP DIFFUSE VERONTREINIGING, 1988. Basis voor mestregelgeving in grondwaterbeschermingsgebieden. Rapport van de Werkgroep Diffuse Verontreiniging. DGMH/IPO/VNG (in druk).
- WERKGROEP NOORD-HOLLAND, 1982. Kwantiteit en kwaliteit van grond- en oppervlaktewater in Noord-Holland benoorden het IJ. Regionale studies 16, ICW, Wageningen, 185 pp.
- WESSELING, J., 1976. Gevolgen van drinkwateronttrekking voor de landbouw. H_2O 9(14): 3-7.
- WIGGERS, A.J., C.H.E. WERKHOVEN en J.H.A.M. STEENVOORDEN, 1986. Advies beperking uitrijperiode dierlijke meststoffen. Wageningen, 94 pp.